

# Asenkron makinalarda uzay harmoniklerinin etkilerini azaltmaya katkılar

Derya Ahmet KOCABAŞ\*, Ahmet Faik MERGEN

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Bu çalışmada, asenkron makinada uzay harmoniklerinin etkilerini azaltmaya yönelik yapısal değişiklikler araştırılmış ve çözüme ulaşılmıştır. Farklı oluk sayılarında bir fazın  $\frac{1}{4}$ 'ü için yeni oluk merkezi konumları, ampersarım değerleri, bir faz ve üç faz verileri hesaplanmıştır. Bir asenkron motor tasarım programı hazırlanmıştır ve güvenilirliği, gerçek bir motoru tasarlayıp sonuçlar kıyaslanarak gösterilmiştir. Örnek makina ile aynı oluk sayısındaki analitik sonuçlar bu program ile gerçekleşmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Man-yetik analiz sonuçları beklendiği gibidir. Her iki makinada, uzay harmoniği eşdeğer devreleri ile hız moment eğrileri hesaplanarak klasik sargılı makinadaki bozucu etkinin yeni tasarlanan makinada görülmediği tespit edilmiştir. Makinadaki verim artışı en umut verici sonuçtur.*

**Anahtar Kelimeler:** Uzay harmonikleri, sargı, asenkron motor tasarımı.

## Contributions to reduce the effects of space harmonics in induction machines

### Abstract

*In this study, an analysis of constructional changes to reduce the space harmonic effects involved by the air gap mmf function is performed and resulted with success. It is shown that the results can be obtained for certain number of slots. The results are the brand new slot positions and the value of amper-turn at the slots. They vary according to the number of the slots and are obtained for the quarter of a phase. All information about three phase of the machine is calculated from these results. Harmonic spectrums are shown and winding factors are calculated for different number of slots. A programme for designing an induction machine is prepared. To prove the reliability of this programme, a sample motor is designed by this programme and the results are compared with the experimental values and producer's simulation values. The analytical result that has the same number of slots with the sample motor is designed by this reliable programme and the expected results are obtained. For both machines, speed-torque characteristics of space harmonics are calculated. The decrease in the torque caused by space harmonics in standard machine is not encountered in the brand new machine. An increase in the efficiency is the most hopeful result.*

**Keywords:** Space harmonics, windings, desing of inducton motors.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Derya Ahmet KOCABAŞ. [derya@elk.itu.edu.tr](mailto:derya@elk.itu.edu.tr); Tel: (212) 285 67 71.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Asenkron makinalarda uzay harmoniklerinin etkilerinin azaltılması için yapısal değişiklikler" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 14.03.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 22.06.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Asenkron makina saf sinüs biçimli bir kaynaktan beslense bile, ampersarım değeri hesaplandığında karşımıza sinüsten farklı bir manyetomotorkuvvet (mmk) eğrisi çıkar. Makinanın hava aralığına bakan stator yüzeyinde stator iletkenleri saf sinüs biçimli dağılmadığından sarım sayısı ile akım değerini çarparak elde ettiğimiz ampersarım ifadesi saf sinüs biçimli olmaz. Dağılım, örneğin 1 A için incelendiği zaman, oluk içerisindeki ampersarımın basamak fonksiyonu şeklinde arttığı düşünülürse, mmk ifadesi konuma bağlı değişen bir fonksiyon halini alır. Her t zaman anındaki akım değeri ile bu ifade çarpıldığında, genliği akıma bağlı değişen ama her an basamaklı bir şekle sahip ampersarım ifadesi elde edilir. Bu basamaklı alan şekli hava aralığı boyunca elde edildiğinden makina açısı içindeki konuma bağlıdır. Buna göre periyodik olan bu basamaklı fonksiyon Fourier serisine açılabilir ve harmonikleri hesaplanabilir. Burada hesaplanacak harmonikler konuma ve akımın zamana bağlı değişimine bağlıdır. Makinanın içinde her konumda akıma bağlı farklı bir değişim gözlenir. Sabit bir konumda ise hesaplanan her harmonik akımın değişim frekansında değişen bir büyüklük halini alır. Anlaşılabileceği üzere makina uzayında sabit bir noktada sinüs biçimli dağılmamış her sargı yapısı, akım frekansında sonsuz sayıda harmonik üretir. İşte bu harmonikler uzay harmonikleridir ve zaman harmoniklerinden farklı bir bakış açısı gerektirir. (Mergen, 1982)

Uzay harmoniklerinin varoluşu makinanın doğasından kaynaklanmaktadır. Makina içindeki konuma bağlı olduklarından yapısal çözümler ile etkileri azaltılabilir. Her birinin kendi genliği ile orantılı bir gücü ve momenti vardır. Harmoniğin derecesi arttıkça daha yavaş dönme söz konusudur. En etkili uzay harmonikleri 5. ve 7. harmoniklerdir. 3 ve katı olan uzay harmonikleri makina içinde döner alan oluşturmazlar (Kostenko ve Piotrovsky, 1974; Boduroğlu, 1988). Makina normal koşullar altında senkron hıza yakın çalıştığından ve bu hızlar civarında uzay harmonikleri asenkron makina frenlediklerinden moment azaltıcı bir etkileri vardır. Özellikle düşük hızlarda küçük dereceli harmoniklerin moment azaltıcı etkileri çok fazla hissedilir

(Kostenko ve Piotrovsky, 1974; Boduroğlu, 1988) Uzay harmoniklerinin etkilerinin azaltılmasına yönelik önlemler mevcuttur. En yaygın ve kafada kalıcı olanı bobinin belirli oranlarda kirşlenerek önlem alınmasıdır (Kuhlman, 1951; Boduroğlu, 1994). Kirşlemenin oranına göre istenilen harmoniğin etkisi yokedilebilir. Burada yokedilmek istenen harmonik sayısı fazla değildir. Hedef en etkili olanlar olarak alınır.

Literatürde uzay harmoniklerinin hesabına ilişkin yöntemler mevcuttur. Bunlardan Stepina'nın çalışması farklı ve ilginçtir (Stepina, 1987). Burbidge'in geliştirdiği asimetrik sargılar için geçerli olan yöntemi döneminin şartlarında oldukça verimli idi (Burbidge, 1958). Stepina'nın uzay harmoniklerinin incelenmesi ve hesabı üzerine başka çalışmaları da vardır. (Stepina, 1979) Bahsedilen çalışmaların hızlandırıldığı, bilgisayar destekli analizlerin yapılmasını sağlayan başka çalışmalar da mevcuttur (Kocabaş, 1997; Kocabaş ve Mergen, 2000; Kocabaş ve Mergen, 2001). Böylelikle sargı üzerinde kısa bir analizden sonra doğrudan uzay harmoniklerinin hesabını yapmak mümkün olabilmektedir.

Anlaşılabileceği üzere uzay harmoniklerinin optimizasyonu ancak yapısal değişiklikler ile olur. Ampersarımda sağlanacak bir iyileşme doğrudan bu büyüklüğe bağlı olan gerilim, moment ve akıma etki eder. Bu büyüklüklerde bir iyileşme gözlenecektir (Mergen, 1982) Buradan yola çıkarak, makinanın klasik sargı ve stator yapısından farklı bir yapı kullanılması düşünülmüştür.

## Uzay harmoniklerinin analizi

$Q_s$  oluklu,  $2p$  kutuplu ve  $m$  fazlı bir alternatif akım sargısı için sargı tasarlandığında hesaplanacak ilk büyüklük  $q$ , faz ve kutup başına düşen oluk sayısıdır (Boduroğlu, 1988)

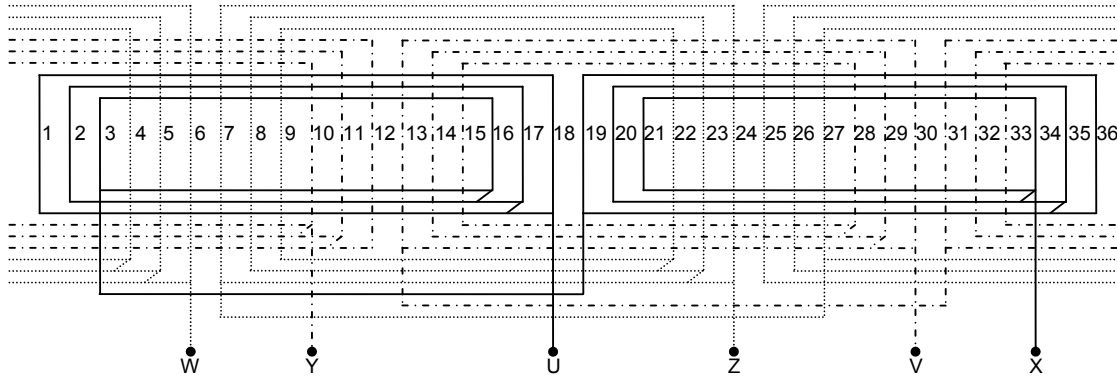
$$q = \frac{Q_s}{2p.m} \quad (1)$$

Buradaki incelemeler bir kutup çifti altında yapılacaktır. Kullanılacak açılar elektriksel açıdır. Bir kutup için yapılan incelemeler diğer kutuplar için de geçerlidir.

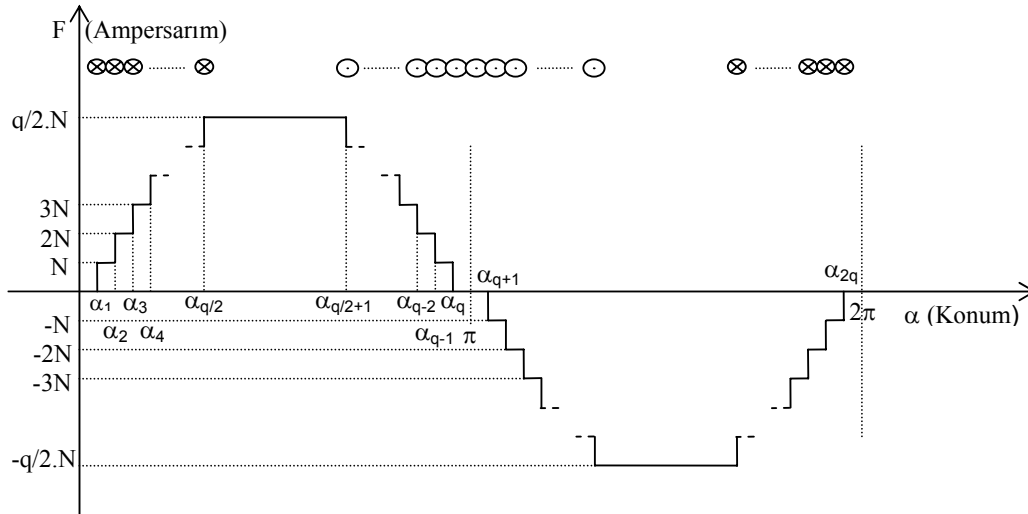
Şekil 1’de 3 fazlı, 36 oluklu ve 2 kutuplu bir sargı yapısı görülmektedir (Bobinlerin bağlanma şekli yine örnek motor ile aynıdır) Bir faz sargısından 1 A akım geçtiği ve oluk ampersarımının oluk merkezinde darbe şeklinde arttığı düşünülürse elde edilecek alan şeklinin genel görünümü basamaklı olacaktır. Her bir basamağın yüksekliği ve aralarındaki mesafe aynıdır. Bu ifade makina uzayındaki açıya bağlı periyodik bir fonksiyondur ve Fourier serisine açılabilir (Şekil 2).

İleride kullanılacak örnek motorla aynı olması açısından faz başına sarım sayısı 150 seçilirse, Şekil 1’de verilen şemaya göre elde edilecek 1

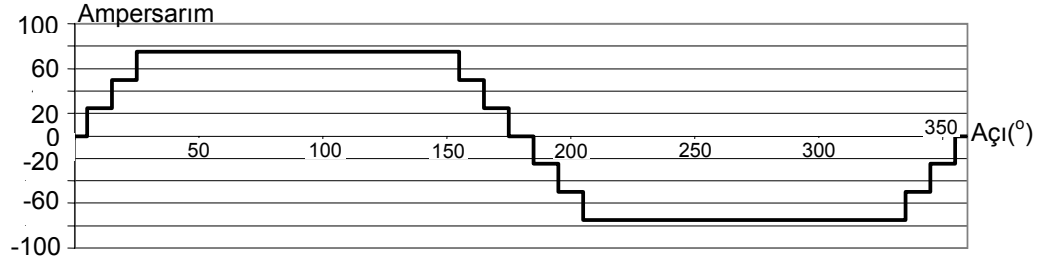
A için alan şekli Şekil 3’teki gibi olur. Her bir fazın bir kutup altında 6 oluğu olduğundan her bir olukta 25 sarım olacaktır. Makinadaki olukların içinde hangi faza ait kaç iletkenin ve bu iletkenlerin sarım yönlerini gösteren iletken matrisi de Tablo 1’de görülebilir. Bahsedilen sargı şeması ve iletken dağılımı için yapılan Fourier analizi sonucunda klasik sargıdaki uzay harmoniklerinin elde edilen dağılımı Şekil 4’te verilmiştir. Sargı faktörü de daha önceden hazırlanmış yazılımlar ile hesaplanabilir (Kocabaş, 1997; Kocabaş ve Mergen, 2000 ve 2001). Harmonikler için hesaplanan sargı faktörleri de Tablo 2’de görülebilir.



Şekil 1. 3 fazlı, 2 kutuplu ve 36 oluklu her faz için 3 kısmi bobinli sargı yapısı



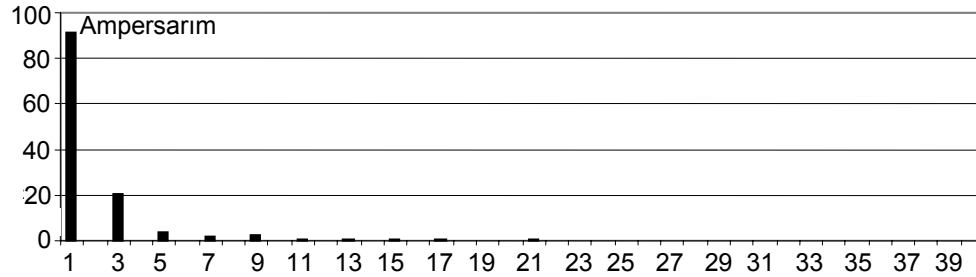
Şekil 2. Klasik sargıda 1A akım için bir fazın alan dağılımının genel şekli



Şekil 3. Faz başına 150 sarımlı örnek motorun 1 A için bir faz ampersarım fonksiyonu

Tablo 1. Örnek makina için iletken matrisi

Oluk Konumu (°)	İletken matrisi [z]			Oluk Konumu (°)	İletken matrisi [z]		
	R	S	T		R	S	T
5	25	0	0	185	-25	0	0
15	25	0	0	195	-25	0	0
25	25	0	0	205	-25	0	0
35	0	0	-25	215	0	0	25
45	0	0	-25	225	0	0	25
55	0	0	-25	235	0	0	25
65	0	0	-25	245	0	0	25
75	0	0	-25	255	0	0	25
85	0	0	-25	265	0	0	25
95	0	25	0	275	0	-25	0
105	0	25	0	285	0	-25	0
115	0	25	0	295	0	-25	0
125	0	25	0	305	0	-25	0
135	0	25	0	315	0	-25	0
145	0	25	0	325	0	-25	0
155	-25	0	0	335	25	0	0
165	-25	0	0	345	25	0	0
175	-25	0	0	355	25	0	0



Şekil 4. Faz başına 150 sarım ve 1 A için hava aralığı mmk fonksiyonunun harmonik dağılımı

### Uzay harmoniklerinin optimizasyonu

Hava aralığında varolan uzay harmoniklerinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için bu harmoniklerin ortadan kaldırılması işlemi gerçekleştirilirken asenkron makinanın genel prensiplerinden vazgeçilmemeli ve döner alanın oluşması engellenmemelidir. Bunun için eksenleri arasında  $120^\circ$  fark bulunan 3 fazlı sargının 3 fazlı gerilim ile beslenmesi yeterlidir. Uzay harmonikleri bir faza ait büyüklüklerde yok edildiklerinde toplam fonksiyonda da doğal olarak gözükmeyeceklerdir. Bir faz sargı yapısını değiştirmek ve bu değişiklikleri diğer iki faza da uygulamak gereklidir. Bu çalışmada, bir faza ait basamaklı yapıdaki alan şeklinin, oluklardaki sarım sayısı ve oluklar arası mesafe değiştirilmesi ve bu yolla varolan uzay harmoniklerinin yokedilebilmesi araştırılmıştır. Bu amaçla sayısal analiz yöntemleri kullanılabilir. İşlem sonucunda sayısal olarak elde edilen her çözümün fiziksel gerçekleştirilebilirliği olmayabilir. Önemli olan harmonikleri sıfır yapan ve gerçekleştirilebilir bir sonuç elde edebilmektir.

Çeyrek dalga simetrisine uygun bir çözümü baştan kabul etmek hem sadece bir tip harmonik ( $a_e$  ya da  $b_e$ ) olmasını, hem de çift dereceli harmoniklerin baştan yokedilmesini sağlar. Ayrıca fiziksel açıdan bakıldığında bir oluktaki iletkenlerden  $180^\circ$  sonra aynı sayıda ve ters işaretli iletkenler varolacak bu da bobinlerin teşkil edilmesinde kırılganlık yapmaksızın fayda sağlayacaktır. Çeyrek dalga simetrisi sebebi ile alan şeklinin  $\frac{1}{4}$ 'ünün incelenmesi yeterli olacaktır. Optimize edilmiş konum değerleri için herhangi bir başka hesaba gerek yoktur. Bunun yanısıra elde edilen ampersarımlardan sarım sayılarına geçmek için ek bir işlem daha yapmak gereklidir. Yapılan optimizasyon sonucunda elde etmeyi amaçladığımız dalga şeklinde basamakların yükseklikleri ve basamaklar arasındaki mesafe birbirlerinden farklıdır (Şekil 5).

Bir faz alan dağılımı incelendiğinden alan şeklinde bir kutup çifti altında  $2q$  oluk, makinada ise toplam  $6q$  oluk olacaktır. Buradan da her oluk sayısı için çözüm araştırılamayacağı ortaya çıkar. İyileştirme yapılabilecek oluk sayıları Tablo 3'te görülebilir. Dalganın  $\frac{1}{4}$ 'ü irdelendiğinden değiştirilebilecek oluk konumu ve ampersarım

değerleri sayıları  $q/2$ 'şer adettir. Elde edilen çözümleri başka sarım sayılarına da uyarlayabilmek için basamak fonksiyonunun tepe değerini 100 As ile, başka bir deyişle toplam sarım sayısını 200 sarım ile sabit tutmak uygundur. Böylelikle optimize edilebilen bir değişken eksilmiş olur ve toplam değiştirilebilir büyüklük sayısı  $q/2$  tane oluk konumu ve  $(q/2-1)$  tane ampersarım değeri olmak üzere  $(q-1)$  olur.

Tablo 2. Örnek sargı için harmonik sargı faktörleri

e	$k_{we}$	e	$k_{we}$	e	$k_{we}$	e	$k_{we}$
1	0.9556	11	0.0998	21	0.1805	31	0.1895
3	0.6401	13	0.0992	23	0.0992	33	0.6401
5	0.1895	15	0.1805	25	0.0998	35	0.9556
7	0.1538	17	0.087	27	0.2404	37	0.9556
9	0.2404	19	0.087	29	0.1538	39	0.6401

### Optimizasyon yöntemi

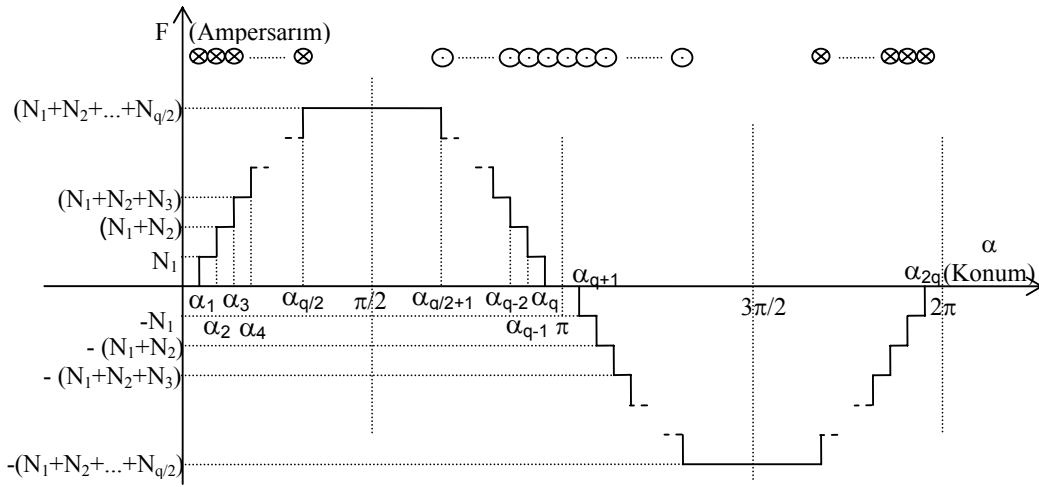
Optimizasyon için sayısal analiz yöntemlerinde Newton-Raphson metodu kullanılmıştır. (Demirel, 1990) Önerilecek  $[x]$  çözüm matrisinin  $q$  tane elemanı vardır. İlk  $q/2$  elemanı sıralı oluk konumlarından, kalan elemanlar ampersarım değerlerinden oluşur.  $[f(x)]$  matrisi optimize edilecek harmonik fonksiyonlarıdır. 3 ve 3'ün katları olan harmonikler döner alan oluşturmadıklarından optimize edilmelerine gerek yoktur. Sadece  $6k \pm 1$  dereceli harmoniklerin yokedilmesi yeterlidir. Burada amaç  $[f(x)]$  matrisinin elemanlarını sıfır yapmaktır.

### Optimizasyon yazılımı

Yukarıda kısaca özetlenen matematiksel yöntem MATLAB altında gerçekleştirilmiştir. Program sırasında sıfır olduğu bilinen  $a_e$  katsayılarının da sıfır olduğu hesaplanarak teyid edilmiştir. Program çalıştırılınca oluk sayısı, çeyrek dalgadaki oluk konumları ve ampersarımlar, hesap yapılacak en büyük harmonik ve programın duracağı en küçük değişim değerleri istenmektedir.  $q/2=2,3,4,5$  ve 6 için çözümler elde edilmiş ve oluk sayılarına bağlı olarak da harmonikleri yok edebilecek çözümlere ulaşılmıştır ve her çözüm için sargı faktörleri hesaplanmıştır (Kocabaş ve Mergen, 2000 ve 2001). Elde edilen çözümlerden sadece örnek makina ile aynı sayıda olan çift kutup başına 36 oluk için sonuçlar verilecektir.

Tablo 3. Optimizasyon yapılabilecek oluk sayıları ve yok edilebilen harmonikler

Kutup Çifti Başına Oluk Sayısı	Faz Başına Oluk Sayısı	Faz-Kutup Başına Oluk Sayısı	Yok Edilebilecek Harmonik Sayısı	Çeyrek Dalgadaki Oluk Sayısı	Yok Edilen Harmonikler	Var Olan İlk Uzay Harmoniği
$(Q_s/p)$	$[Q_s/(m.p)]$	$[q=Q_s/(m.2p)]$	$(q-1)$	$q/2$		
12	4	2	1	1	5	7
24	8	4	3	2	5,7,11	13
36	12	6	5	3	5,7,11,13,17	19
48	16	8	7	4	5,7,11,13,17,19,23	25
60	20	10	9	5	5,7,11,13,17,19,23,25,29	31



Şekil 5. Optimizasyon sonrası elde edilmesi planlanan alan şekli

### Optimize edilmiş değerlere örnek

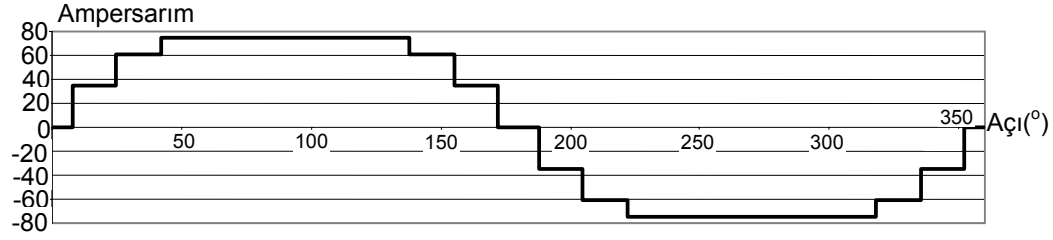
Çift kutup başına 36 oluklu makinada çeyrek dalga için optimize edilmiş oluk konumları ve ampersarım değerleri 2 no'lu denklemdir. Buna göre bir faz için elde edilen alan şekli Şekil 6'da, bu alan şekli için elde edilen harmonik dağılımı Şekil 7'dedir. Tüm makinaya ait büyüklükler Tablo 4'te, yeni sargı yapısının harmonik sargı faktörleri ise Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 4'te verilen değerlere ilişkin sargı şeması ise Şekil 8'dedir.

$$\begin{aligned} [\alpha] &= [8^\circ \quad 25^\circ \quad 42^\circ] \\ [F] &= [35 \quad 61 \quad 75] \end{aligned} \quad (2)$$

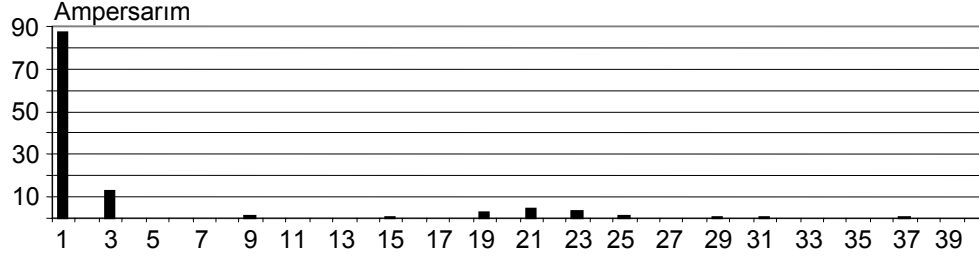
### Tasarım programı

Buraya kadar ortaya konan ve karşılığı matematiksel olarak elde edilen düşüncelerin doğrula-

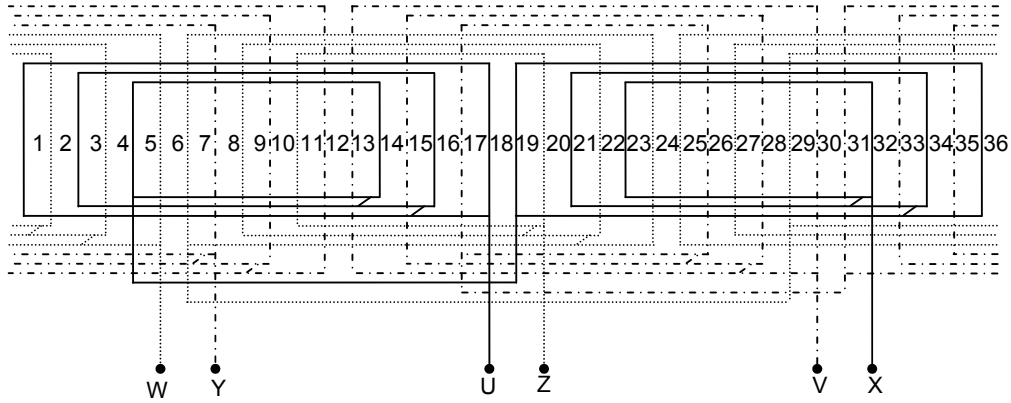
nabilmesi için gerçek bir motor ile karşılaştırma yapılmalıdır. Yeni tasarlanacak makina için güvenilirliği ispatlanmış bir tasarım programına ihtiyaç vardır. Bir tasarım programı hazırlanmış, doğruluğunu test edebilmek için bu program ile, seçilen ve daha önceden üretilmiş örnek motor bir kez daha tasarlanmıştır. Bu motorun üretici firmasından fiziksel büyüklükleri, tasarımda kullandıkları simulasyon değerleri, deney sonuçları ve malzeme bilgileri gibi veriler temin edilmiştir. Hazırlanan tasarım programındaki değerler her aşamada gerçek motora ait verilerle karşılaştırılmış, çok büyük ölçüde örtüşmüş ve programın güvenilirliği teyid edilmiştir. Program Excel altında çalışmaktadır. Ana bilgiler ile grafik ve cetvellerden okunarak gereken veriler girilerek sonuç alınmaktadır. Böylelikle işlemler otomatikleştirilmiş, hata riski azaltılmış ve sonuçlarına güvenilir bir program elde edilmiştir.



Şekil 6. Faz başına 150 sarımlı sargının 1 A için optimize edilmiş mmk dalgası şekli



Şekil 7. Faz başına 150 sarımlı sargının optimize edilmiş harmonik dağılımı



Şekil 8. Optimize edilmiş yeni tasarım için sargı şeması

Hazırlanan program makinanın devre parametreleri, malzeme ağırlıkları, işletme büyüklükleri ve kayıplar yönünden çok başarılı sonuçlar vermiştir. Manyetik büyüklüklerde hesap yolu ile ortaya farklılıklar çıktığında FEMM isimli manyetik analiz programı ile inceleme yapılmıştır. Manyetik malzemeler için B-H eğrilerinde Excel altında kısım kısım doğrusallaştırma yapılmış ve hassas okumalar gerçekleştirilmiştir.

Tasarım sırasında kullanılan hesap yöntemleri çalışmanın uzamaması açısından burada verilmeyecektir. (Boduroğlu, 1994; Gürdal, 2001; İkizli, 1962; Kuhlman, 1951) Kullanılan örnek motorun anma gücü 4kW, yıldız bağlı, 380 V,

50 Hz'lik olup anma hızı  $2870 \text{ min}^{-1}$ 'dir. Motorun 2 kutuplu olması elektriksel ve geometrik açı farkını ortadan kaldırmıştır. Varolan gerçek bir motor ile örtüşen sonuçlar vermesi hazırlanan programın yeni tasarlanacak motor için güvenilir bir tasarım programı olduğunun göstergesidir.

### Yeni motorun tasarımı

Hazırlanan tasarım programı ile bu kez de yapısal değişiklikler yapılacak olan yeni sargı tipli makina tasarlanmıştır. Makinanın değişen yapısı gereği bazı büyüklüklerin klasik makinadan daha farklı bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir.

Makinanın stator yapısı değiştirildiğinden gerçekleşen etkiyi tam olarak analiz edebilmek için rotor yapısı hiç değiştirilmemiştir. Sadece stator sargı faktörü Tablo 2 ve Tablo 5'ten görüldüğü gibi farklı olduğundan, hava aralığı endüksiyon genliği daha yüksek seçilmiş ve rotor ile ilgili büyüklüklerden sadece birkaç manyetik büyüklük değişmiştir.

Tablo 4. Faz başına 150 sarımlı sargının oluk konumları ve iletken matrisi

Oluk konumu (°)	Sarım matrisi			Oluk konumu (°)	Sarım matrisi		
	R	S	T		R	S	T
8	35	0	0	188	-35	0	0
18	0	0	-14	198	0	0	14
25	26	0	0	205	-26	0	0
35	0	0	-26	215	0	0	26
42	14	0	0	222	-14	0	0
52	0	0	-35	232	0	0	35
68	0	0	-35	248	0	0	35
78	0	14	0	258	0	-14	0
85	0	0	-26	265	0	0	26
95	0	26	0	275	0	-26	0
102	0	0	-14	282	0	0	14
112	0	35	0	292	0	-35	0
128	0	35	0	308	0	-35	0
138	-14	0	0	318	14	0	0
145	0	26	0	325	0	-26	0
155	-26	0	0	335	26	0	0
162	0	14	0	342	0	-14	0
172	-35	0	0	352	35	0	0

Makinanın tüm oluk dağılımı irdelendiğinde tekrarlanan bir yapı söz konusudur. Tablo 4 incelendiğinde büyüklük olarak 36, 25 ve 14 iletken içeren 3 farklı tipte oluk; 35-35, 35-14, 14-26, 26-26 iletken içeren iki oluk arasında kalan 4 farklı tip dışı mevcuttur. Oluklar arasındaki mesafeler ise 10°, 7°, 10°, 7°, 10° ve 16° olarak tekrarlanmaktadır. Sabit dış akısı elde edebilmek için olukların yapılarının klasik makinenin yapısından farklı olması gerekir. Bunun için oluk yapısı ile ilgili denklemler elde edilmiştir. Dış ve oluk yapıları, Excel altında hazırlanan başka bir hesap programı ile optimize edilmiş ve aralarındaki derinlik farkı en çok 0,04 mm olacak şekilde örnek motordan 3 mm daha derin olarak optimize edilmiştir. Oluk boyutu optimi-

zasyonu sırasında çok iletkenli oluklar uzatılıp daraltıldığı için dişler genişlemiş ve doyma sınırındaki standart makinaya nazaran dış akı yoğunluğu azalmıştır. Stator boyunduruk yüksekliği örnek motorla aynı tutulmuş akı yoğunluğu makul seviyede yükselmiş, bununla birlikte stator dış çapı büyümüştür. Stator olukları farklı şekillerde olduğundan Carter faktörü ortalama oluk ağız ve ortalama oluk adımı ile hesaplanmıştır. Oluk ağızlarının makina uzayında kapladığı alan örnek makinadan daha fazla olduğundan Stator Carter faktörü beklendiği gibi daha düşüktür. Bu da daha az hava aralığı manyetik gerilimine ihtiyaç duyulmasını sağlar.

Tablo 5. Yeni tasarlanan sargı yapısının harmonik sargı faktörleri

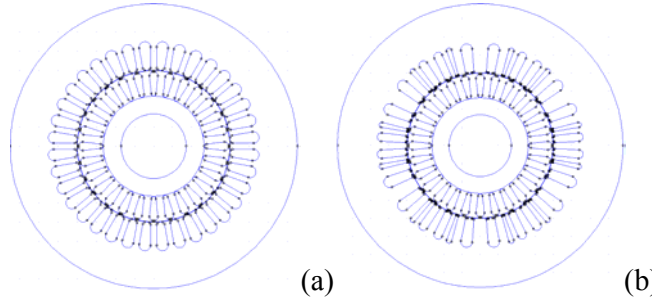
e	k <sub>we</sub>	e	k <sub>we</sub>	e	k <sub>we</sub>	e	k <sub>we</sub>
1	0.9148	11	0.0065	21	0.9689	31	0.1223
3	0.4057	13	0.0242	23	0.8247	33	0.0255
5	0	15	0.0934	25	0.3067	35	0.062
7	0.0014	17	0.0054	27	0.0281	37	0.1794
9	0.0855	19	0.5192	29	0.0919	39	0.0458

Klasik stator yapısı değiştirildiğinden makinenin bazı büyüklüklerinin hesap şekli de değiştirilmelidir. Tablo 1 ve Tablo 4 sargı şemaları ile birlikte karşılaştırıldığında bobin genişliklerinin açılma olarak azaldığı görülmektedir. Aynı iletken sayısına sahip iki sargıdan yeni tasarlanan yapıda daha az bakır kullanılmış ve iletken uzunluğu, bakır ağırlığı, stator direnci azalmıştır. Bu da makinenin verimine olumlu bir katkıdır.

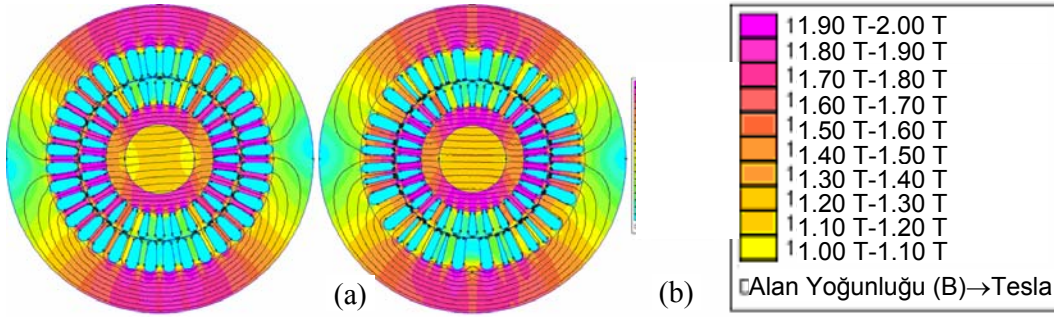
Oluk kaçak reaktansı ( $X_{\sigma o}$ ) klasik makinadan farklı olarak, farklı boyutlu oluklar için ayrı ayrı hesaplanmış ve toplanmıştır. Olukların derinleşmesi oluk kaçak reaktansını arttırmıştır. Bobin adımları kısaldığı için bobinbaşı dağılma reaktansı ( $X_{bb}$ ), Carter faktörü küçüldüğünden hava aralığı dağılma reaktansı ( $X_{ha}$ ) küçülmüştür. Ağırlıklar hesaplanırken örnek makinadan farklı olarak stator dış ağırlığı hesabı değiştirilmiştir.

Tasarlanan makina sonlu elemanlar yöntemini kullanan FEMM programı altında incelenmiştir.

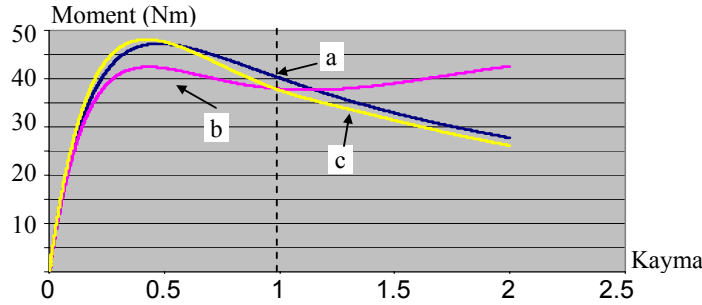




Şekil 7. (a) Örnek motor, (b) Yeni tasarlanan motor için demir yapıları



Şekil 8. (a) Örnek makina, (b) Yeni tasarlanan makina için yapılar ve manyetik analiz sonuçları



Şekil 9. a) Örnek motorda temel bileşen için kayma-moment, b) Örnek motorda 1,5,7,11,13 ve 17. uzay harmonikleri için kayma-moment c) Yeni motorda aynı harmonikler için eğri

### Uzay harmoniklerinin momentleri

Uzay harmonikleri için MATLAB altında bir yazılım hazırlanarak çalıştırılmış, 5, 7, 11, 13 ve 17. harmonikler için kayma, uzay harmoniklerinin kendi kaymaları, eşdeğer devre parametreleri, akımları, güçleri ve endükledikleri moment değerleri  $-3000 \text{ min}^{-1}$  ve  $3000 \text{ min}^{-1}$  hızları arasına denk düşen 0 ile 2 arasındaki 4000 kayma değeri için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Excel ortamında derlenmiş ve klasik sargılı örnek makina tasarımı ve yeni sargılı tasarım için kayma moment eğrileri elde edilmiştir. Yeni motorda hesap yapılan uzay harmonik-

lerinin moment olarak etkileri sıfır olduğu için Şekil 9'da bu makina için tek eğri verilmiştir.

### Tasarım verilerinin karşılaştırılması

Yapılan çalışmalar sonucunda, hesaplanan klasik sargılı makina ile yeni sargılı makina arasında genel çatı benzer kalmak kaydı ile değişiklikler olmuştur. Bu değişikliklerden olumlu katkısı bulunanlar olduğu gibi, bazısının makine performansı üzerine olumlu sayılmayacak etkileri de vardır. Burada bu etkiler gruplandırılarak sunulmuştur ve analizlerin hepsinde motorun beslendiği kaynağın saf sinüs gerilimi ürettiği kabul edilmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Faz başına 150 sarımlı sargının oluk konumları ve iletken matrisi

OLUMLU YÖNLER			OLUMLU SAYILMAYACAK YÖNLER		
Büyüklik	Simge	Değişim	Büyüklik	Simge	Değişim
Stator Carter faktörü	$k_{c1}$	-7.43%	Sargı faktörü	$k_{w1}$	-4.20%
İki hava aralığındaki magnetik gerilim	$2 \cdot V_{\delta}$	-3.37%	Hava aralığı endüksiyon genliği	$B_{\delta}$	4.38%
Stator dış endüksiyonları	$B_{d1max}$	-1.85%	Hava aralığı akısı	$\phi$	4.38%
Toplam magnetik gerilimi	$\Sigma V$	-0.51%	Stator boyunduruk endüksiyonu	$B_{j1}$	4.35%
Bobin genişliği (1.tip bobin)	$y_1$	-0.59%	Rotor boyunduruk endüksiyonu	$B_{j2}$	0.87%
Bobin genişliği (2.tip bobin)	$y_2$	-6.17%	Rotor boyunduruk akısı	$\phi_{j2}$	0.87%
Bobin genişliği (3.tip bobin)	$y_3$	-18.00%	Yüzde olarak mıknatıslanma akımı	$\%(I_{\mu}/I_n)$	3.85%
Ortalama bobin genişliği	$y$	-7.97%	Rotordaki dış endüksiyonu	$B_{d2max}$	4.38%
Ortalama sarım uzunluğu	$l_{sarım}$	-3.72%	Stator dış çapı	$D_{dış}$	4.01%
Bir fazın toplam iletken uzunluğu	$L_{iletken}$	-3.72%	Stator sargısının dağılma reaktansı	$X_{1\sigma}$	15.14%
Stator sargısı toplam uzunluğu	$L_{1iletken}$	-3.72%	Rotor hava aralığı dağılma reaktansı	$X_{2\sigma ha}$	10.00%
Stator sargısının direnci	$R_1$	-3.72%	Kısadevre kafesi dağılma reaktansı	$X_{2\sigma}$	4.36%
Kısadevre direnci	$R_k$	-5.41%	Kısadevre reaktansı	$X_k$	6.81%
Bobin başı uzunluğu	$l_{bb1}$	-13.33%	Ana reaktans	$X_m$	-3.96%
Bobin başı dağılma iletkenliği	$\Lambda_{bb1}$	-21.33%	Toplam stator demir ağırlığı	$G_{feS}$	12.39%
Stator yüksek harmonik gerilim sabiti	$K_1$	-12.36%	Toplam demir ağırlığı	$G_{fe}$	9.69%
Stator bobin başı dağılma reaktansı	$X_{1\sigma bb}$	-21.33%	Toplam stator demir kayıpları	$P_{feS}$	7.46%
Stator hava aralığı dağılma reaktansı	$X_{1\sigma ha}$	-3.60%	Kısadevre akımı	$I_k$	1.44%
Toplam bakır ağırlığı	$G_{cu}$	-3.72%	Kısadevre güç faktörü	$\cos \phi_k$	-4.29%
Stator sargısı omik kayıplar	$P_{Kcu1}$	-3.72%	Yolalma momenti (Temel bileşen)	$M_{dy}$	-5.89%
Rotor kafesi omik kayıplar	$P_{Kcu2}$	-8.22%	Boşta çalışma akımının aktif bileşeni	$I_{fe}$	1.69%
Toplam kayıplar	$\Sigma P_K$	-3.27%	Boşta çalışma akımı	$I_o$	3.82%
Anma yükünde verim	$\eta_n$	0.51%	Boşta çalışma güç faktörü	$\cos \phi_{10}$	-2.05%
Anma kayması	$S_n$	-7.48%	Boşta çalışma güç açısı	$\phi_{10}$	0.18%
Anma yükünde çekilen aktif güç	$P_{1n}$	-0.50%	Anma yükünde çekilen reaktif güç	$Q_{1n}$	4.66%
			Anma yükündeki güç faktörü	$\cos \phi_n$	-0.71%

## Sonuç

Asenkron makinanın hava aralığında oluşan hem makina içindeki konuma, hem de zamana bağlı değişen uzay harmoniklerinin özellikle düşük hızlarda hissedilen olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılmasına yönelik yapısal bir çözüm önerisi getirebilmek amacı ile başlanılan çalışma hedeflediği sınırların üstünde bir başarı elde ederek amacına ulaşmıştır. Katedilen kilometre taşları ve çalışmanın değerlendirme sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Hava aralığı ampersarım fonksiyonunda varolan harmonikleri yok edebilmek için simetrik olmayan bir sargı yapısı prensipleri belirlenmiş ve buna yönelik sayısal analiz

yöntemleri incelenmiştir. Sonuca ulaşılabilir olacak oluk sayıları tespit edilip Newton-Raphson sayısal analiz metodu ile çeyrek dalga simetrisine uyan bir alan yaratmaya yarayan, bu yolla çift harmonikleri ve  $a_c$  kat-sayılarını yokeden bir sayısal çözüm araştırılmış ve sonuca ulaşılmıştır. Geliştirilen sayısal analiz yöntemi ile faz ve kutup başına düşen 2, 3, 4, 5, 6 oluk sayıları için, oluk sayısı ile orantılı bir şekilde uzay harmoniklerini yok etmek için bir kutup çifti altında matematiksel sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan tüm sayısal çözümler için üç fazlı sargı için tüm oluk konumlarını ve oluklardaki sarım sayılarını hesaplayan Matlab altında çalışan yazılımlar gerçekleştir-

- tirilmiştir. Küsurlu sarım sayısı olamayacağından, hesaplanan sayısal değerlerde yapılacak yuvarlamaların ihmal edilebilir olduğu harmonik analizleri ile tespit edilmiştir.
2. Tüm oluk konumları ve sarım sayıları bilinen oluk sayıları için iletken matrisleri oluşturulmuş ve sargı faktörü analizi yapılmıştır. Hesaplanan sargı faktörlerinin hiç birisi 0,909'un altına düşmemiştir. Elde edilen sonuçlardan bobinlerin nasıl oluşturulacağı açıklanmış, bir örnek için sargı şeması çizilmiş ve uygulanabilir oldukları gösterilmiştir. Bu yolla harmonik spektrumu 5 ve 7. harmonikler üzerinden daha yavaş dönen ileri dereceli harmoniklere ötelenmiştir. Faz ve kutup çifti başına toplam oluk sayısının (q) bir eksiği kadar uzay harmoniğinin sıfır olması sağlanmıştır.
  3. Excel altında çalışan bir asenkron motor hesap programı hazırlanmıştır. Programın güvenilirliğini sağlamak amacı ile belirlenen gerçek motor bu hesap programı ile bir kez de tarafımızdan tasarlanılmıştır. Hesap aşamalarının doğruluklarını ve varsa hata paylarını hesaplayabilmek için motor verileri ve simulasyon bilgileri kıstas olarak alınmıştır.
  4. Optimize edilmiş asenkron motor hesap programı ile yeni sargılı motor tasarımına başlanmıştır. Yeni geliştirilen sargı yapısının etkilerini tekil olarak gözlemleyebilmek için, tasarım sırasında örnek motorun sadece sargı ve stator yapısı değiştirilmiş ve yapısal ve işletme büyüklükleri açısından gerekmedikçe farklı büyüklükler kullanılmamıştır. Değiştirilmiş stator yapısı için yeni oluk hesabı yöntemleri araştırılmış Excel altında bir oluk optimizasyon programı hazırlanmıştır.
  5. Tasarlanan yeni stator yapısında oluklar örnek makinadakinden 3 mm daha derin hesaplanmış, bununla birlikte oluk kaçak reaktansı büyürken, stator dış yüzey alanı büyümüş, dış akı yoğunluğu küçülmüş ve stator Carter faktörü iyileşmiştir. Azalan Carter faktörü sonucu hava aralığı ampersarım değeri azalmıştır.
  6. Dişlerin genişlemesi ve akı yoğunluğunun düşmesi sebebi ile daha az ampersarım ihtiyacı doğmuş, bu da doyma faktörünü küçültmüştür. Sargı faktörünün daha düşük olması sebebi ile, statorunda endüklenen gerilimi örnek makinadaki ile aynı yapabilmek için, hava aralığı akı yoğunluğu ve hava aralığı akısı normalden büyük seçilmiştir. Yine aynı sebeple hava aralığı kaçak reaktansı hesabında gerekli olan  $K_1$  yüksek harmonik katsayısını azaltmıştır. Bu da bu reaktans değerini azaltmıştır.
  7. Kullanılan sargı şekli ile yeni hesaplanan oluk konumu ve sarım sayıları ile daha az bakır iletken kullanmak mümkün olmuştur. Bakır boyu kısaldığı için toplam stator direnci değeri, daha kısa bobin başları kullanıldığı için "bobin başı dağılma reaktansı" değeri küçülmüştür. Azalan bobin başı ve hava aralığı kaçak reaktansları ve artan oluk kaçak reaktans değerleri ile stator kaçak reaktans değeri artmıştır.
  8. Hava aralığı akısı arttığı ve boyunduruk kesidi sabit kaldığı için rotor akı yoğunlukları artmıştır. Rotor kaçak reaktansı, kısadevre reaktansı, mıknatıslanma reaktansı büyümüştür.
  9. Dişler derinleştirilip boyunduruk yüksekliği sabit tutulunca stator dış çapı büyümüş, bu da stator ve toplam demir ağırlıklarının artmasına sebep olmuştur. Stator diş genişlikleri büyüdüğü için diş ağırlıkları da yükselmiştir. Ayrıca boyunduruk yükseklikleri sabit tutulup akı yoğunluğu arttığı için boyunduruk kayıpları hem statorunda, hem de rotorunda artmıştır. Demir kayıpları stator boyundurduğunda büyümüştür. Toplam demir kayıpları artmıştır. Demir kayıpları arttığından dolayı demir direnci akımı ve boşta akım sırası ile artmıştır.
  10. Daha düşük sargı faktörü ile çevirme oranı değişmiş, rotorda endüklenen gerilimi artmış ve aynı güç için daha az akım gerekmiştir. Çubuk ve halka akımları küçülmüştür. Böylelikle rotor bakır kayıpları hiç bir yapısal değişiklik yapılmamasına rağmen azalmıştır.

11. Toplam kayıplar azalmıştır. Anma yükünde verim artmıştır. Böylelikle ülke ekonomisine katkı sağlanmıştır. Motorun anma gücünde şebekeden çektiği aktif güç azalırken, reaktif güç artmıştır. Boşta çalışma güç faktörü küçülmüş, boşta çalışma açısı büyümüştür. Değişen kısıadevre eşdeğer devre parametreleri sebebi ile kalkış akımı artmış bununla birlikte kalkış momenti azalmıştır. Bu durum sadece temel bileşen içindir.
12. Örnek makinadaki uzay harmonikleri de dikkate alındığından toplam kalkış momentleri arasında fark yoktur. Motorun anma kayması daha küçük çıktığı için, hız moment karakteristiği örnek motorun daha yukarısından geçecek olan yeni motor yük momenti değişimlerinde daha az hız değişikliğine sebep olacaktır.
13. Yapılan manyetik analizler sonucunda hesaplar ile analizler birbirini tutmuş, artış ve azalış görülmesi beklendiği söylenen her yerde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yeni tasarlanan makinanın stator dış akı yoğunluğu gözle görülür bir biçimde az çıkmaktadır.

## Kaynaklar

- Boduroğlu T., (1988). *Elektrik Makinaları Dersleri, 2, 1, Döner Alternatif Akım Makinalarına Giriş*, Beta Basım Yayın, İstanbul.
- Boduroğlu, T., (1988). *Elektrik Makinaları Dersleri, Asenkron Makinalar (Teorik Bilgi), 2, 2*, Beta Basım Yayın, İstanbul.
- Boduroğlu, T., (1994). *Elektrik Makinaları Dersleri, Asenkron Makinaların Hesap ve Konstrüksiyonu, 2, 3*, Beta Basım Yayın, İstanbul.

- Burbidge, R.F., (1958). *A rapid method of analysing the mmf wave of a single or polyphase winding*, Proc. IEE, 105 C, 307-311.
- Demirel A., (1990). Güneş peteğinden beslenen bir soğutucu tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gürdal, O., (2001). *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Atlas Yayınevi, İstanbul.
- İkizli, O., (1962). *Elektrik Makinalarında Dağılıma, Kayılar ve Isınmanın Hesapları*, Şirketi Mürettebiye Basımevi, İstanbul.
- Kocabaş, D.A., (1997). Alternatif akım makinalarında uzay harmoniklerinin bilgisayar destekli analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kocabaş, D.A. ve Mergen, A.F., (2000), Çok fazlı asimetrik sargılarda uzay harmoniklerinin ve sargı faktörünün Matlab destekli analizi, *ELECO 2000, Elektrik, Bursa, Türkiye, Kasım*, 99-102.
- Kocabaş, D.A. ve Mergen, A.F., (2001). Uzay fazörleri ile simetrisiz stator sargılarında uzay harmoniklerinin ve sargı faktörünün bilgisayar destekli matrisel analizi, *ELECO 2001, Elektrik, Kocaeli, Türkiye, Ekim*.
- Kostenko, M., Piotrovsky, L., (1974). *Electrical Machines in Two Volumes, 2*, Mir Publishers, Moskova.
- Kuhlman, J.H., (1951). *Elektrik Makinelerinin Hesabı*, Kutulmuş Basımevi, İstanbul.
- Mergen, A. F., (1982). Asenkron motorlarda besleme gerilimi frekansının değiştirilmesi ile devir sayısı ayar yöntemlerinin kritik etüdü, *Doçentlik Tezi*, İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul.
- Stepina J., (1979). Non-Transformational matrix analysis space harmonics of electrical machines, *ELECTR. Mach. And Electromech.*, 4, 255-268.
- Stepina J., (1987). Matrix analysis of space harmonics of asymmetrical stator windings, *Proc. IEE Vol. 134, Pt.B, No.4*.